

# 公共埠頭の最適配置と最適規模の決定法

## A METHOD OF DETERMINING OPTIMUM ALLOCATION AND SIZE OF PUBLIC WHARVES

則 武 通 彦\*・木 村 作 郎\*\*

By Michihiko NORITAKE and Sakuo KIMURA

### 1. 序 論

従来、公共外貿一般雑貨埠頭の計画に関しては、埠頭における最適バース数を決定するための計算手法の開発に多大の努力が傾注されてきた<sup>1)4)</sup>。そのうち、則武<sup>3)</sup>は、公共一般雑貨埠頭において消費される費用について分析し、国民経済的な評価基準に基づいて公共埠頭の最適バース数を決定するための統一的方法論を提示した。さらに著者らは<sup>2)</sup>、公共埠頭においてある数のバースで荷役することが最適な港湾取扱貨物量の範囲、すなわち最適バース容量を決定するための図表の作成とその利用方法について考察した。その結果、国の経済計画、背後地域の経済条件、土地利用計画、対象港湾の立地条件、商習慣などによりダイナミックに変動する貨物需要量に対して、当該港湾に建設、整備されるべき最適バース数は迅速に求められるようになった。

しかしながら、それらの研究においては、ある特定の対象港湾に関する貨物需要量が計画目標としてあらかじめ与えられなければならないので、その計画目標を達成することのできる当該港湾の最適バース数が決定されるにすぎない。しかし、それら各港湾の貨物需要量は与件値として単独に設定されるものではなく、各港湾に建設、整備されるべきバース数と相互に関係して、同時に最適化されなければならない。すなわち、単一港湾のみの最適バース数を決定するだけでは不十分であり、一国あるいは一地域内に存在する複数の港湾の相互関係を考慮した最適埠頭計画が作成されなければならない。よって、本研究では国民経済的な立場に基づいて、一国あるいは一地域内の複数の港湾に建設されるべき公共埠頭の最適な配置と規模を同時に決定する方法論について考察

する。

### 2. 公共埠頭を経由する貨物フローシステムのモデル化

一般に、公共埠頭を経由して外国へ輸出入される一般雑貨の流れは、図-1 のように示される。図-1 において、

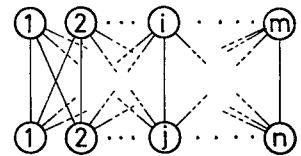


図-1 一般雑貨の輸送システム

$i$  : 国内の貨物生産地 (あるいは消費地), ( $i=1, 2, \dots, m$ )

$j$  : わが国の港湾 ( $j=1, 2, \dots, n$ )

である。そして、図-1 に示される一般雑貨の輸送システムにおいて費やされる総費用  $C_T$  (\$/年) は、総内陸輸送費用  $C_I$  (\$/年) と総港湾輸送費用  $C_P$  (\$/年) とに大別され、それらはそれぞれ次のように定式化される。

$$C_T = C_I + C_P \dots \dots \dots (1)$$

$$C_I = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} \dots \dots \dots (2)$$

$$C_P = \sum_{j=1}^n C_j^S \dots \dots \dots (3)$$

ここに、

$c_{ij}$  : 地域  $i$  と港湾  $j$  の間の内陸輸送費用 (\$/トン)

$x_{ij}$  : 地域  $i$  と港湾  $j$  の間を輸送される貨物量 (トン/年)

$C_j^S$  : 港湾  $j$  におけるバース数が  $S$  のとき、その港湾で消費される年間輸送費用 (\$/年)

である。なお、実際には各港湾と諸外国の間での海上輸送費用も発生する。しかし、わが国の主要定期航路は航路距離が非常に長いので、各航路で費やされる海上輸送費用は各港湾に関してほぼ同一とみなされる。よって、本研究では、システムの総費用の中に海上輸送費用は含めない。次に、地域  $i$  の発生・吸収貨物量を  $Q_i$  (トン/

\* 正会員 工博 関西大学助教授 工学部土木工学科  
\*\* 正会員 工修 関西大学情報処理センター (前・関西大学助手)

年) とすると, 地域  $i$  に関する輸送貨物量の総和は  $Q_i$  にならなければならない. よって,

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = Q_i \dots \dots \dots (4)$$

となる. さらに, 輸送貨物量に関しては非負条件が満足されなければならないので,

$$x_{ij} \geq 0 \dots \dots \dots (5)$$

となる.

すなわち, 本研究において考察される一般雑貨の輸送問題は, 式 (4), (5) で示される制約条件を満足し, しかも輸送システムで消費される総費用  $C_T$  が最小となるような内陸輸送経路と各港湾のバース数を同時決定することである. その場合, 式 (2) の費用関数は線形計画法の輸送問題において扱われるものと同じタイプであるから, 取扱いは簡単である. しかし, 式 (3) の港湾輸送費用に関しては, 次章のような考察が必要である.

### 3. 港湾輸送費用の分析<sup>2)</sup>

公共埠頭におけるバース数が  $S$  のとき, 港湾  $j$  で消費される年間輸送費用  $C_j^S$  は, 港湾に建設, 整備されるバースに関する費用と港湾に在港する船舶に関する費用との和であり, 次のように表わされる<sup>1)</sup>.

$$C_j^S = c_b T S + c_s T \bar{n}_S \dots \dots \dots (6)$$

ここに,

$c_b$ : バースの1日当たり費用 (\$/日・バース)

$c_s$ : 船舶の1日当たり費用 (\$/日・隻)

$S$ : 港湾  $j$  におけるバース数

$T$ : 考察の対象とされる港湾オペレーションの期間 (本研究では1年=365日とする)

$\bar{n}_S$ : バース数が  $S$  のときの船舶の平均在港隻数

である.

ところで, 従来の多数の研究によると, 港湾における船舶の動態を分析するためには,  $M/M/S(\infty)$  およびアーラン次数  $k=2, 3$  の  $M/E_k/S(\infty)$  のタイプの待ち行列理論モデルが最も実際的であることがわかっている<sup>1), 14)</sup>. よって, 式 (6) に含まれている船舶の平均在港隻数  $\bar{n}_S$  を計算するために,  $M/E_k/S(\infty)$  のタイプの待ち行列理論モデルに対する Cosmetatos の近似公式<sup>15)</sup> を用いれば

$$C_j^S = c_b T S + c_s T \left[ \frac{a^{S+1}}{(S-1)!(S-a)^2} \left\{ \sum_{n=0}^{S-1} \frac{a^n}{n!} + \frac{a^S}{(S-1)!(S-a)} \right\}^{-1} \left\{ \frac{1+(1/k)}{2} + \left(1 - \frac{1}{k}\right) \left(1 - \frac{a}{S}\right) (S-1) \frac{\sqrt{4+5S-2}}{32a} \right\} + a \right] \dots \dots \dots (7)$$

が得られる. ここに,

$a$ : トラフィック密度 (traffic intensity,  $=Q_j/(RT)$ )

$Q_j$ : 港湾  $j$  における取扱貨物量 (トン/年)

$R$ : パース1日当たりの平均荷役率 (トン/バース・日)

$k$ : 船舶のサービス時間分布のアーラン次数

である. また, システムの平衡条件として,

$$a/S < 1 \dots \dots \dots (8)$$

が成立していなければならない.

式 (7) において, パースの費用  $c_b$ , 船舶の費用  $c_s$ , バース数  $S$  および船舶サービス時間分布のアーラン次数  $k$  の値を設定すると, 港湾輸送費用  $C_j^S$  はトラフィック密度  $a$  のみの関数となる.

図-2 は, 上式 (7) において,  $k=1$ ,  $c_b=600$  (\$/日・バース),  $c_s=2400$  (\$/日・隻) の場合の  $C_j^S$  と  $a$  の間の関係をバース数  $S$  をパラメーターとして示したものである.

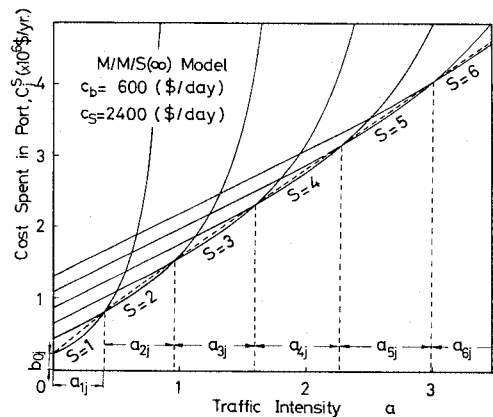


図-2 港湾輸送費用とトラフィック密度の関係

### 4. 可分計画法によるモデルの解法

前章における分析より明らかなように, 式 (1) のうち総内陸輸送費用  $C_I$  は輸送貨物量に関して線形であるが, 総港湾輸送費用  $C_P$  は非線形であるので, 式 (1) をそのままの形で最小化することは困難である. よって, 本研究では, 図-2 の破線で示されるように  $C_j^S$  を部分線形関数によって近似し, 一般雑貨輸送システムのモデルを可分計画法 (separable programming) によって解くこととする. 一般に, 可分計画法は, 次に示す制限を満たす非線形関数を処理することができる.

①  $t$  個の独立変数をもつ非線形関数は, どれか1つの変数だけで表わされる  $t$  個の関数の和となるように分離可能である. すなわち,

$$y = f(\mathbf{X}_t) = f_1(X_1) + f_2(X_2) + \dots + f_t(X_t) \dots \dots \dots (9)$$

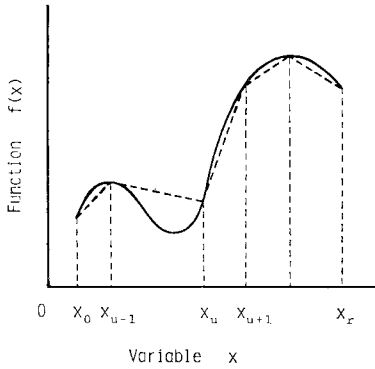


図-3 セパラブル関数への部分線形近似

となる。

②  $l$  個の関数のおのおのは、部分的に線形近似できる。たとえば、図-3 において、ある関数のグラフが実線で示されるものとすれば、それは破線で示されるように部分線形近似される。そして、この部分線形近似したものをセパラブル関数 (separable function) という。

可分計画問題を 図-3 のような形にして解く方法は、デルタ法 (delta method) とよばれ、そのアルゴリズムは次のとおりである。

① 非線形関数  $f(X)$  に関する独立変数  $X$  は、1 組のスペシャル変数 (special variables) で表わされる。

② これらのスペシャル変数は、 $f(X)$  を部分線形近似の形で表現する。そして、スペシャル変数のおのおのは、部分線形近似を行う際にある特定の区間で進んだ距離を示している。たとえば、スペシャル変数  $dX_u$  は、関数  $f(X)$  を近似するために用いられる  $r$  個のスペシャル変数のうち  $u$  番目のものであるとすると、それは一般的に次のように書くことができる。

$$dX_u = (X - X_{u-1}) / (X_u - X_{u-1}) \dots\dots\dots(10)$$

ただし、

$$X_{u-1} \leq X \leq X_u$$

である。ここで、 $X_{u-1}$  と  $X_u$  は、図-3 に示されるように  $X$  軸を分割する隣接した 2 点である。さらに、各スペシャル変数は下限値が 0、上限値が 1 であり、それらの順序は  $X$  軸の方向により規定される。

③ スペシャル変数が基底に入ることができるのは、その前の変数が上限にあるか、あるいは隣り合う変数のうちのいずれか一つが基底であるかのいずれの場合に限られる。

④ 独立変数  $X$  は、次の形のグリッド方程式で与えられる。

$$X = X_0 + \sum_{u=1}^r \Delta X_u \cdot dX_u \dots\dots\dots(11)$$

ここに、

$$\Delta X_u = X_u - X_{u-1} \dots\dots\dots(12)$$

である。よって、非線形関数  $f(X)$  を上記のスペシャル変数  $dX_u$  ( $u=1, 2, \dots, r$ ) で表わすと次のようになる。

$$f(X) = f(X_0) + \sum_{u=1}^r \Delta f(X_u) \cdot dX_u \dots\dots\dots(13)$$

ただし、

$$\Delta f(X_u) = f(X_u) - f(X_{u-1}) \dots\dots\dots(14)$$

である。上式 (13) は、スペシャル変数  $dX_u$  に関する線形関係式である。したがって、次の制約を考慮すれば、このスペシャル変数  $dX_u$  を線形計画法の中に入れておくことができる。

$$\begin{aligned} 0 &\leq dX_u \leq 1 \\ dX_0 &= dX_1 = \dots = dX_{u-1} = 1 \\ dX_{u+1} &= \dots = dX_r = 0 \end{aligned}$$

ここで、 $dX_u$  はこの組の中で基底となるただ 1 つの変数であり、他の変数はすべて上限、または下限にある。

⑤ 非線形関数が目的関数あるいは制約式のいずれであっても、セパラブル関数に近似される。

以上のことから、本研究の場合、図-2 に示されるセパラブル関数は次式によって定義される。

$$\text{Cost Equation : } C_j^S = b_{0j}v_{0j} + b_{1j}v_{1j} + b_{2j}v_{2j} + \dots\dots\dots(15)$$

$$\text{Grid Equation : } a_j = a_{1j}v_{1j} + a_{2j}v_{2j} + \dots\dots\dots(16)$$

ここに、

- $a_j$  : 港湾  $j$  におけるトラフィック密度
- $a_{1j}, a_{2j}, \dots : a_j$  に関係した定係数
- $b_{0j}, b_{1j}, \dots : C_j^S$  に関係した定係数
- $v_{0j}, v_{1j}, \dots$  : スペシャル変数

である。ただし、 $b_{0j}$  の値は  $c_b T$  である。さらに、 $a_{1j}, a_{2j}, \dots$  および  $b_{1j}, b_{2j}, \dots$  の値は、それぞれ 図-2 に示される  $a$  および  $C_j^S$  の区分間隔であり、 $c_b, c_s, k$  の値が与えられれば一意的に決定される。

ところで、可分計画法を用いる場合、得られた最適解は実際には局所解であり、システム全体に対する最適解、すなわち大域的な最適解であるという保証がない。そのため、ある探索経路によって局所解が得られた場合、別の経路によって得られた解と比較することによって、その解が大域的な最適解であることを確かめなければならない。本研究で使用された SETBOUND プロシジャは、その確認作業を行うために任意のスペシャル変数を上限値 1 に設定する方法であり、その後最適化プロシジャを用いて最適解が求められる。もし SETBOUND プロシジャが用いられないときは、スペシャル変数はすべて下限値 0、すなわちすべての港湾の取扱貨物量が 0 に初期設定されることになる。しかし、本研究においては、SETBOUND プロシジャを用いることによ

り各港湾に対して種々の初期値設定を行うことができ、大域的な最適解を求めることができる。

また、セパラブル関数に部分線形近似する際に用いられるスペシャル変数の数 $r$ と近似誤差との関係については、次章(3)で若干の考察を加える。

5. 可分計画法の適用可能性の検証

(1) 輸送問題の設定と計算結果

前述された港湾の最適な配置と規模を決定する方法論の適用可能性を検証するため、図-4に示される3地域と2港湾(港湾A, B)からなる輸送問題を解く。

与件として、地域 $i$ から港湾 $j$ への単位貨物量当たりの内陸輸送費用 $c_{ij}$ と地域 $i$ における発生・吸収貨物量 $Q_i$ の値は表-1の上段に示されている。一方、表-1の下段には各港湾に関する1日当たりバース関係費用 $c_b$ 、船舶関係費用 $c_s$ 、バースの平均荷役率 $R$ および船舶サービス時間分布のアーラン次数 $k$ の値を示している。なお、港湾Bに関しては

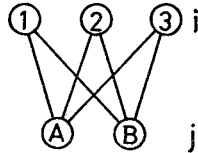


図-4 輸送問題のパターン

表-1 輸送問題のデータ

$i \backslash j$	$c_{ij} (\$/t)$		$Q_i (\times 10^3 t/yr.)$
	A	B	
1	10	80	10
2	38	40	5
3	80	10	10

	A	B1	B2	B3	B4
$c_b (\$/day\text{-berth})$	600	600	600	1200	600
$c_s (\$/day\text{-ship})$	2400	2400	2400	2400	2400
$R (t/day\text{-berth})$	600	600	600	600	1200
$k$	1	1	3	1	1

表-2 輸送問題の最適解

	Port	$Q_j (\times 10^3 t/yr.)$	$C_j^S (\times 10^6 \$/yr.)$	$C_j^* (\times 10^6 \$/yr.)$	$S_j$	$i$	Cost ( $\times 10^6 \$/yr.$ )
Case 1	A	1.50	8.57	29.00	11	1, 2	$C_P=14.46$ $C_I=39.00$ $C_T=53.46$
	B1	1.00	5.89	10.00	8	3	
Case 2	A	1.50	8.57	29.00	11	1, 2	$C_P=14.39$ $C_I=39.00$ $C_T=53.39$
	B2	1.00	5.82	10.00	7	3	
Case 3	A	1.50	8.57	29.00	11	1, 2	$C_P=16.07$ $C_I=39.00$ $C_T=55.07$
	B3	1.00	7.51	10.00	7	3	
Case 4	A	1.00	5.89	10.00	8	1	$C_P=10.43$ $C_I=40.00$ $C_T=50.43$
	B4	1.50	4.54	30.00	6	2, 3	

4種類の異なるデータ(B1~B4)を想定して最適化計算を行い、各パラメーターの値が最適解に及ぼす感度を分析する。特に、B1のケースはA, B両港湾の特性が完全に一致している。

表-2は、可分計画法を用いた最適化計算によって得られた結果を示している。ここで、Case 1, 2, 3および4は、港湾Aに関するデータが固定されたままで港湾BのデータのみがそれぞれB1, B2, B3およびB4のケースに設定された場合に対応している。表-2においては、最適解が得られたときの各港湾に関する年間の取扱貨物量 $Q_j$ 、港湾輸送費用 $C_j^S$ 、内陸輸送費用 $C_j^*$ 、バース数 $S_j$ が示されており、また、 $i$ は各港湾に輸送されるのが最適な地域ブロックの番号である。さらに、右端の欄にはそのときの総港湾輸送費用 $C_P$ 、総内陸輸送費用 $C_I$ 、輸送システム全体の総費用 $C_T$ の値が各ケースに対して求められている。なお、この最適化計算においては、各バース数が最適となるトラフィック密度 $a$ の区間はおおの1本の直線で近似されている。

(2) 図解法による最適解の検証

前節において得られた貨物輸送問題の最適解が大域的な最適解であることは、SETBOUNDプロシジャを用いて確認された。本節では、さらに前節で得られた最適解を、図解法によって得られる最適解と比較し、解の最適性について検証する。そのため、一般雑貨の輸送システム全体を内陸輸送システムと港湾輸送システムという2つのサブシステムに分け、各サブシステムに対する最適解を図式的に加え合わせるによりトータルシステムの最適解を求める。なお、本節ではCase 4についてのみ検討する。図-5は、横軸に港湾Aでの年間取扱貨物量 $Q_A$ をとり、縦軸に総内陸輸送費用 $C_I$ 、総港湾輸送費用 $C_P$ 、システムの総輸送費用 $C_T$ を表わしたものである。総内陸輸送費用 $C_I$ は、線形計画法のMODI法

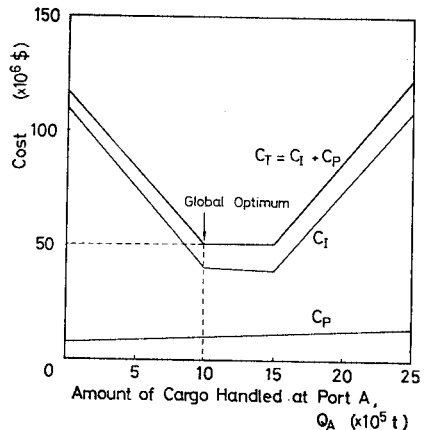


図-5 図解法による最適解

(modified distribution method) を用いて求められている。図-5 の  $C_I$  曲線より、内陸輸送システムのみでの最適化を図る場合、地域 1, 2 の貨物 (150 万トン) を港湾 A で取り扱うときに最適解が得られる。そして、このとき、港湾 B は地域 3 の貨物 (100 万トン) のみを扱っている。一方、総港湾輸送費用曲線  $C_P$  は、港湾 A での取扱貨物量  $Q_A$  の各レベルでの港湾 A での港湾輸送費用曲線に、そのレベルに対応した港湾 B での港湾輸送費用曲線を加え合わせるにより得られる。図-5 の  $C_P$  曲線によると、 $Q_A$  が 0 (よって、港湾 B での取扱貨物量  $Q_B$  が 250 万トン) の場合に、港湾輸送システムでの最適解が得られる。この結果は、港湾 B 4 の貨物荷役率が港湾 A のその 2 倍であることによる。図-5 に示されるシステムの総輸送費用  $C_T$  は、総内陸輸送費用  $C_I$  と総港湾輸送費用  $C_P$  の和として求められる。よって、輸送システム全体の最適解は、 $Q_A$  が 100 万トンの場合に得られ、地域 1 の貨物は港湾 A、地域 2, 3 の貨物は港湾 B で取り扱われる。以上のことから、トータル輸送システムとしての最適解 (大域解) は、内陸輸送および港湾輸送という 2 つのサブシステムおのおの最適解 (局所解) とは異なることが判明した。さらに、上述の図式解法で求められた輸送システム全体の最適解は、前節で解かれた Case 4 の場合の最適解と一致している。したがって、この種の輸送問題に可分計画法を適用することは妥当である。

(3) 計算結果の考察

5.(1) で得られた輸送問題の最適化計算の結果 (表-2) より、以下のことが明らかである。

① 船舶のサービス時間分布の規則性が最適解に及ぼす影響は、Case 1 と 2 を比較することによってわかる。その結果、港湾 B のサービス時間分布のアーラン次数が 1 から 3 になっても、内陸輸送のパターンおよび港湾 A の最適バース数にはなんら変化を生じないが、港湾 B の最適バース数は 1 だけ減り、よって、総港湾輸送費用の低減になる。

② バースの建設費、維持・管理費などが最適解に及ぼす影響は、Case 1 と 3 の比較で明らかになる。すなわち、港湾 B のバース関係費用が 2 倍になれば、港湾 B の最適バース数は 1 だけ減り、総港湾輸送費用も増大する。しかし、内陸輸送パターンと港湾 A の最適バース数は不変である。

③ Case 1 と 4 を比較すれば、バースの平均荷役率が最適解に及ぼす影響を把握できる。すなわち、港湾 B の貨物荷役率が 2 倍になれば、地域 2 の貨物は港湾 B に転換する。これは、地域 2 に関しては、港湾 B での荷役速度の向上によって、内陸輸送の面での不利な条件を克

表-3 港湾輸送費用の計算例

分割数	港湾輸送費用と相対誤差 $e$					
	$C_A^a$ ( $\times 10^6$ \$/yr.)	$e(\%)$	$C_B^a$ ( $\times 10^6$ \$/yr.)	$e(\%)$	$C_P=C_A^a+C_B^a$ ( $\times 10^6$ \$/yr.)	$e(\%)$
1	5.892	0.17	4.537	0.71	10.429	0.40
2	5.885	0.05	4.511	0.13	10.396	0.09
4	5.882	0.00	4.507	0.04	10.389	0.02
厳密解	5.882	—	4.505	—	10.387	—

服できるからにはほかならない。よって、港湾荷役の高性能率化は、その港湾の集荷ポテンシャルを向上させることになる。また、港湾 B での荷役速度の向上により、港湾 A, B での最適バース数はいずれも減少し、総港湾輸送費用とシステム総費用の低減に寄与する。

④ 一般に、非線形関数を部分線形近似するために使用される分割点の数が多いほど、得られる最適解の近似度も向上する。表-3 は、Case 4 において港湾 A, B の最適バース数が得られたトラフィック密度  $a$  の区間、すなわち  $S_A=8$  および  $S_B=6$  が最適となる区間をさらに細分割して、分割数とそのときの最適解の近似度との関係を調べたものである。表-3 より、上述の分割数が多くなるほど港湾輸送費用の最適値は図解法による厳密解に近づくことがわかる。しかし、分割数を多くしても、埠頭計画に最も興味のある各港湾の最適バース数は不変であり、また、分割数が 1 の場合においてさえ、総港湾輸送費用  $C_P$  の最適値の相対誤差は 0.4% 程度であり、非常に小さい。よって、次章での最適化計算においては、各バース数が最適となる  $a$  の区間を一本の直線で近似する (すなわち、分割数を 1 とする)。

また、図-2 より明らかのように、各バース数が最適となる港湾輸送費用曲線は、バース数が大きいほど直線近似されやすくなるので、表-3 における  $C_A^a$  の方が  $C_B^a$  よりも相対誤差が小さい。

6. 適用例とその考察

(1) 適用例の概要

本章では、事例研究として、ある対象年度の特定外貿航路における一般雑貨の総貨物量を 1000 万トンと想定して、わが国のいくつかの港湾に建設、整備されるべき公共埠頭の最適バース数を前述の方法論を用いて決定する。そのため、まず、表-4 に示されるように、わが国の代表的な 8 港湾 ( $j=T\sim H$ ) と全国 10 地域ブロック ( $i=1\sim 10$ ) に関するデータを設定する。この 8 港湾の中には、東京湾、大阪湾、伊勢湾などの既存外貿港湾とともに、今後国際貿易港湾として発展が予想される港湾も含まれている。表-4 には、表-1 と同様に、貨物トン

表-4 事例研究のデータ

i \ j	c <sub>ij</sub> (\$/t)								Q <sub>i</sub> (×10 <sup>3</sup> t/yr.)
	T	P	I	O	K	M	D	H	
1	41	45	50	53	77	5	8	63	0.5
2	28	32	40	46	50	10	4	54	2.3
3	3	8	14	20	40	40	27	27	45.8
4	16	8	2	10	23	50	42	18	13.8
5	21	12	10	17	27	44	40	22	1.0
6	23	18	11	4	16	53	46	13	26.6
7	28	23	15	13	9	65	49	4	4.9
8	32	26	22	15	14	70	54	8	1.4
9	46	33	23	17	2	77	60	9	3.5
10	51	40	27	20	5	82	65	14	0.2
c <sub>b</sub> (\$/day-berth)	1200	600	1200	1200	600	600	600	600	
c <sub>s</sub> (\$/day-ship)	2400	2400	2400	2400	2400	2400	2400	2400	
R (t/day-berth)	1200	600	1200	1200	600	600	600	600	
k	3	1	3	3	1	1	1	1	

表-5 事例研究の最適解

	Port	Q <sub>j</sub> (×10 <sup>3</sup> t/yr.)	C <sub>j</sub> <sup>S</sup> (×10 <sup>6</sup> \$/yr.)	C <sub>j</sub> <sup>*</sup> (×10 <sup>6</sup> \$/yr.)	S <sub>j</sub>	q <sub>j</sub> (×10 <sup>3</sup> t/berth)	i	Cost (×10 <sup>6</sup> \$/yr.)
Case 1	T	48.6	16.62	22.23	14	3.47	1~3	C <sub>P</sub> =35.04 C <sub>I</sub> =51.45 C <sub>T</sub> =86.49
	I	14.8	5.65	3.76	5	2.96	4, 5	
	O	36.6	12.77	25.46	11	3.33	6~10	
Case 2	T	48.6	16.62	22.23	14	3.47	1~3	C <sub>P</sub> =37.39 C <sub>I</sub> =43.94 C <sub>T</sub> =81.33
	P	0	0	0	0	—		
	I	14.8	5.65	3.76	5	2.96	4, 5	
	O	28.0	9.99	12.74	9	3.11	6, 8	
Case 3	K	8.6	5.13	5.21	7	1.23	7,9,10	C <sub>P</sub> =39.16 C <sub>I</sub> =34.57 C <sub>T</sub> =73.73
	T	45.8	15.73	13.74	14	3.27	3	
	P	0	0	0	0	—		
	I	14.8	5.65	3.76	5	2.96	4, 5	
	O	26.6	9.53	10.64	9	2.96	6	
	K	3.7	2.44	0.80	4	0.93	9,10	
	M	2.8	1.93	2.55	3	0.93	1, 2	
D	0	0	0	0	—			
H	6.3	3.88	3.08	5	1.26	7, 8		

当たりの内陸輸送費用  $c_{ij}$  (\$/トン)、各地域の発生・取扱貨物量  $Q_i$  (トン/年) および各港湾の特性を表すパラメーター ( $c_b, c_s, R, k$ ) の値が示されている。特に、T, I, O の3港湾は大港湾であり、バースの平均荷役率  $R$  とバースの1日当たり費用  $c_b$  は他の港湾の2倍、また船舶のサービス時間分布のアーラン次数は3とする。そして、対象港湾がそれぞれ3港湾 (T, I, O)、5港湾 (T, P, I, O, K) および8港湾 (T, P, I, O, K, M, D, H) の場合について、前述のアルゴリズムを用いて外貨貨物輸送システムの最適化計算を行う。

(2) 計算結果と考察

表-5 は、表-4 のデータを用いて可分計画法による最適化計算を行い、得られた結果を示している。表-5 において、Case 1 は対象港湾が T, I, O の3港湾の場合、Case 2 はそれに P と K を加えた5港湾の場合、Case 3 はさらに M, D, H の3港湾を加え総計8港湾の場合である。表中の各欄の表示法は表-2 とまったく

同様であるが、 $q_j (= Q_j/S_j)$  は最適解が得られたときの各港湾の1バース当たりの年間取扱貨物量の原単位(トン/バース・年)を示している。

表-5 より明らかになった事項は、次のとおりである。

① Case 1 の場合、10 地域のうち5地域の貨物が港湾 O、3地域の貨物が港湾 T に集中し、地理的に港湾 T と O の中間に位置する港湾 I の取扱貨物量は少なく、全体の15%程度にすぎない。

② Case 2 の場合、新しく設定された港湾 P はまったく利用されず、港湾 P の背後圏の貨物でさえ港湾 T あるいは港湾 I を経由する方が全体的に有利になる。それに対して、港湾 O で取り扱われていた貨物は、新しく設定された港湾 K に転換される方が有利である。さらに、Case 1 と Case 2 を比較すれば、新たに1港湾 (K) を国際港湾として整備することにより、国全体としての最適バース数は30から35に増加し総港湾輸送費用  $C_P$  も増加すること

がわかる。しかし、総内陸輸送費用  $C_I$  がそれ以上に大幅に減少するので、Case 2 のシステムの総費用  $C_T$  も減少し、Case 2 の方が有利になる。

③ Case 3 の場合、港湾 T で取り扱われていた地域1, 2の貨物は新しく設定された港湾 M にふりわけられ、港湾 O で取り扱われていた地域8の貨物と港湾 K で取り扱われていた地域7の貨物は新しく設定された港湾 H に転換される。また、Case 1 の場合には、5地域からの貨物を取り扱っていた港湾 O が1地域の貨物しか取り扱わないようになっていくことがわかる。新しく設定された港湾 D は、まったく利用されていない。さらに、Case 3 においては、国全体としての最適バース数の合計は40となり、上述の Case 1 から Case 2 を比較した場合と同様に  $C_P$  は増加している。しかし、 $C_I$  が大幅に減少しているため  $C_T$  も減少している。すなわち、Case 2 よりも Case 3 の方が有利である。

④ Case 1, 2 および3を比較することにより、次のことがわかる。すなわち、本事例研究に対して与えられ

たインプットデータの場合には、今後、整備すべき国際港湾の数を増やし、また国全体としてはより多くのバースを建設するという方策が有利である。すなわち、そのような戦略をとることにより  $C_P$  は増加するが、 $C_I$  がそれ以上に減少するため  $C_T$  は減少する。

⑤ 表中のバース当たり年間取扱貨物量の原単位  $q_j$  に関しては次のことがわかる。すなわち、すべてのケースにおいて、大港湾である T, O, I に関する原単位はすべて 30 万トン程度になる。それに対して、港湾 K, M, H における原単位は 10 万トン前後である。よって、従来から埠頭計画においてよく使用されてきているバース取扱貨物量の原単位による最適バース数の決定方法は、簡便ではあるが、輸送システム全体の最適性については必ずしも保証がないと考えられる。したがって、各港湾ごとの船舶の入出港特性、入港船舶およびバースの費用、バースでの荷役状況などを詳細に調査し、さらに本研究で述べられた方法にその調査結果を用いることによって、より厳密な埠頭計画を行う必要がある。

## 7. 結 論

本研究では、港湾の最適な配置と規模を同時決定する方法論を提示した。本研究によって得られた主要な結論は、以下のとおりである。

(1) 公共埠頭を経由して外国へ輸出入される一般雑貨の輸送システムにおいて費やされる総費用を定式化した。そのシステムの総費用のうち総内陸輸送費用は輸送貨物量に関して線形関数であり取扱いは簡単であるが、総港湾輸送費用は非線形関数となり取扱いが困難である。よって、本研究においては、その非線形関数をセパラブル関数で部分線形近似し、可分計画法を用いてトータルシステムを最適化する方法論を提示した。

(2) 可分計画法によって得られる最適解は、実際には局所解である。そのため、本研究では、任意のスペシャル変数を上限値 1 に設定する手法、すなわち SET-BOUND プロシジャを用いて種々のケースの解を比較することにより、大域的な最適解を確認した。

(3) 本研究で提示された方法論の有効性を例示するために、3 地域と 2 港湾からなる輸送問題を解いた。そして、その問題の最適解を図解法によっても求め、その解が可分計画法による解と一致することを確かめて可分計画法の適用可能性を明らかにした。

(4) 港湾輸送費用曲線を部分線形近似するために使用される分割数が多くなれば、最適解における港湾輸送費用の値は厳密解に近づくことが実証された。しかし、本研究の計算例によると、各バース数が最適となるトラフィック密度の区間を一本の直線で近似しても、各港湾

に対して得られる最適バース数は分割数を多くした場合と同一であり、また最適解における総港湾輸送費用の相対誤差も 0.4% 程度であり、非常に小さかった。したがって、本研究で適用された可分計画法においては、部分線形近似のための分割数は各区間に対して 1 で十分であろう。

(5) 事例研究として、ある対象年度の特定外貿航路を想定し、実際的な 8 港湾と 10 地域を設定して、貨物輸送の最適経路と各港湾の最適バース数を決定した。その結果、本研究で述べられた方法論を使用することにより、総港湾輸送費用と総内陸輸送費用との間のトレードオフ関係が明確に把握でき、各港湾の埠頭建設についての有用な情報が得られることがわかった。

(6) また、事例研究による各港湾のバース当たり最適取扱貨物量原単位の値から次のことがわかった。すなわち、一般雑貨の輸送システムを最適化するバース取扱貨物量原単位の値は、埠頭建設関係費用が高く、バースでの荷役が高速化されている港湾ほど大きくなる。したがって、バース当たりの取扱貨物量原単位を用いてあらゆる港湾の最適バース数を決定することは必ずしも輸送システム全体の最適性を保証していることにはならないので、各対象港湾の特性、すなわち船舶の入出港特性、船舶とバースの費用、バースでの荷役状況などを調査し、その調査結果を本研究で述べられた方法に適用することによって、より厳密に埠頭規模を決定すべきであろう。

本研究で述べられた公共埠頭の最適配置と最適規模の決定に関する方法論を実際的な問題に適用するためには、今後、より精度の高いデータが用意されなければならないが、提案された方法論の有用性は実証された。

なお、本研究の数値計算に際しては、アプリケーションプログラムの数値計画法システム MPS/X (Mathematical Programming System/eXtended)<sup>16)</sup> を使い、計算はすべて関西大学情報処理センター FACOM M 160 F を使用した。

## 参 考 文 献

- 1) 則武通彦：公共埠頭における最適バース数の決定に関する研究，土木学会論文報告集，No. 278，pp. 113～122，1978.
- 2) 則武通彦・木村作郎：公共埠頭における最適バース容量の決定に関する研究，土木学会論文報告集，No. 301，pp. 115～123，1980.
- 3) 工藤和男・高野聖三・奥山育英：埠頭の貨物取扱能力についての研究，港湾技研報告，Vol. 4，No. 8，pp. 1～66，1965.
- 4) 吉川和広・香川一男・小山計三：公共埠頭のライナーバース計画に関する研究，土木学会論文報告集，No. 126，pp. 9～15，1966.
- 5) Mettam, J.D.: Forecasting delays to ships in port, The Dock and Harbour Authority, Vol. 47, pp. 380～382, Apr., 1967.

- 6) 長尾義三：外貨定期船雑貨ふ頭の能力評価について，経営科学，Vol. 10, No. 4, pp. 1~19, 1967.
- 7) Jones, J.H. and W.R. Blunden : Ship turn-around time at the Port of Bangkok, Proc. of ASCE, Vol. 94, No. WW2, pp. 135~148, May, 1968.
- 8) Agerschou, H. and J. Korsgaard : Systems analysis for port planning, The Dock and Harbour Authority, Vol. 49, pp. 411~415, Mar., 1969.
- 9) 工藤和男：港湾計画における最適化手法，第4回土木計画学講習会テキスト，土木学会，pp. 107~136, 1971.
- 10) Kudo, K. : A practical approach to the average waiting time of M/G/S type queueing models, Report of Port and Harbour Research Institute, Vol. 11, No. 1, pp. 3~21, Mar., 1972.
- 11) Hansen, J.B. : Optimizing ports through computer simulation—sensitivity analysis of pertinent parameters, Operational Research Quarterly, Vol. 23, No. 4, pp. 519~530, 1972.
- 12) 奥山育英・笹嶋 博・早藤能伸・中井典倫子：ポアソン到着待ち合せモデルの数表—埠頭の数および泊地規模の決定，港湾技研報告，Vol. 13, No. 1, pp. 87~151, 1974.
- 13) 奥山育英・口田 登：待ち合せ理論による最適バース数の決定，港湾技研報告，Vol. 16, No. 3, pp. 101~117, 1977.
- 14) Noritake, M. and S. Kimura : Stochastic models to analyze ships' activities in seaport, Technology Reports of Kansai University, Vol. 21, pp. 179~197, Mar., 1980.
- 15) Cosmetatos, G.P. : Some approximate equilibrium results for the multi-server queue (M/G/r), Operational Research Quarterly, Vol. 27, No. 3, i, pp. 615~620, 1976.
- 16) 富士通：FACOM OS IV MPS/X 解説書，1978.

(1982.3.29・受付)